



止於至善

第四篇 同步电机之

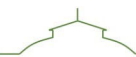
第十四章

同步发电机的不对称运行






東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU



第十四章


同步发电机的不对称运行

- 同步发电机的不对称运行
- 同步电机各序阻抗与等效电路
- 同步发电机的单相稳定短路
- 同步发电机的两相稳定短路



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

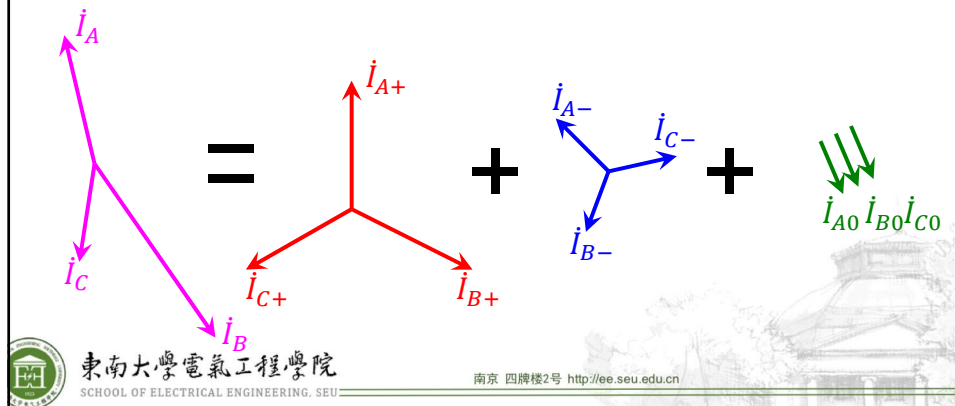
南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>



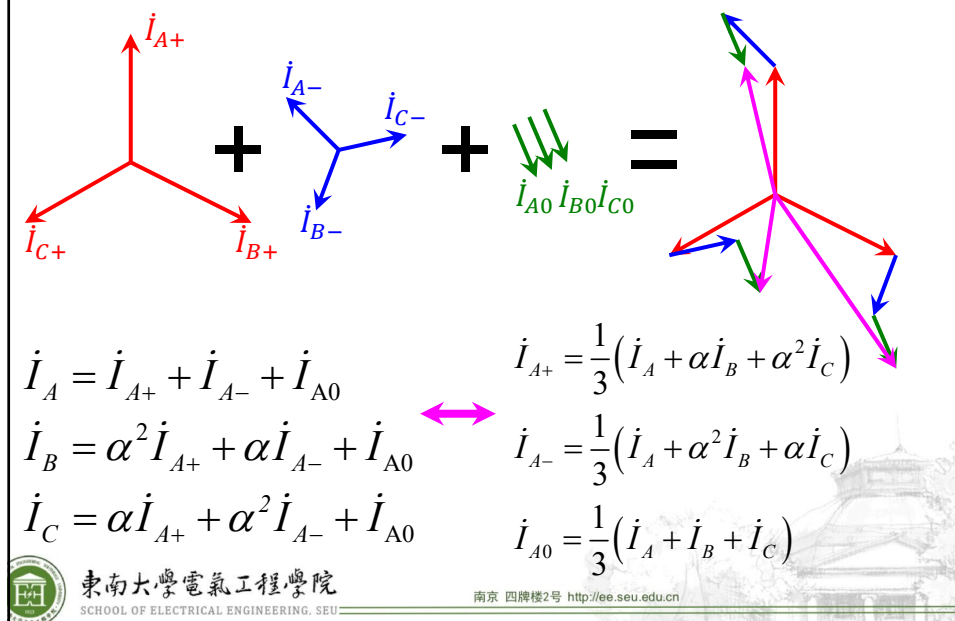
同步发电机的不对称运行

- 不对称运行：三相负载不对称
- 分析方法：对称分量法

把不对称的三相系统分解为三个独立的对称系统，即正序系统、负序系统和零序系统



同步发电机的不对称运行



同步发电机的不对称运行

不对称三相电流流过对称三相绕组的基波磁势

- 每相电流分解为三个分量，每相磁势也分解为三个分量
- **正序**：当**正序电流**流过三相绕组时，产生**正向旋转磁势**，亦称**正序旋转磁势**，对应着**对称运行**
- **负序**：当**负序电流**流过三相绕组时，产生**负向旋转磁势**，以**同步速**和转子转向**相反**的方向旋转，相当于转差率 $s=2$ 的**异步电动机**
- **零序**：当**零序电流**流过三相绕组时，各相零序电流产生三个脉振磁势，幅值相等，时间上同相，而三相绕组在空间相隔 120° 电角度，因此**三相零序基波合成磁势相互抵消**，不形成气隙互磁通



東南大學電氣工程學院

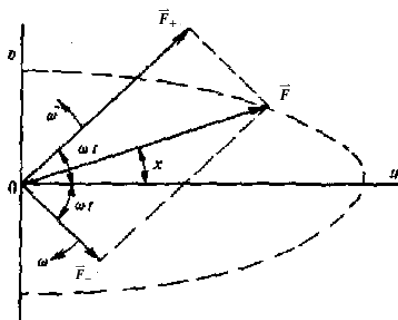
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

同步发电机的不对称运行

- 当电流为一不对称的三相电流，合成磁势将有两个分量，**正序分量**和**负序分量**，各以**同步速向相反方向旋转**。在任一瞬间的合成磁势仍按正弦分布，用旋转矢量表示为空间矢量和，不同时刻，有不同的振幅，其端点轨迹为一椭圆

$$F = \sqrt{u^2 + v^2} = \sqrt{F_+^2 + F_-^2 + 2F_+F_- \cos 2\omega t}$$



東南大學電氣工程

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

1.同步电机各序阻抗与等效电路

- 正序阻抗
- 负序阻抗
- 零序阻抗
- 各序的等效电路



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

I 正序阻抗

- 三相电流**正序分量**产生**正序**旋转磁场—**同步速**
- 转子**同步速**
- 不在转子绕组中感应电势，即同步电机的对称运行情况，**正序电抗即同步电抗**

$$x_+ = x_s$$

- 对凸极机，由于电枢电阻比同步电抗小很多，不对称短路时，电枢电流的正序分量基本上为一纯感性电流，

→ $\psi \approx 90^\circ$ ，即 $I_+ \approx I_{+d}$ ， $I_{+q} \approx 0$ ， $x_+ = x_d$

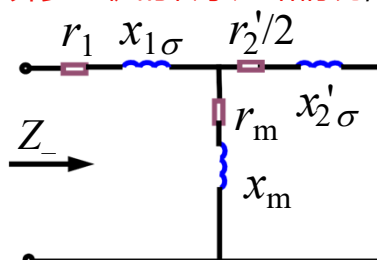


東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

II 负序阻抗

- 三相电流负序分量产生负序旋转磁场—同步速
- 转子同步速
- 相对运动速度为 $2n_1$ ，在转子绕组中感应 $f_2=2f_1$ 的交变电势，产生交变电流，相当于转差率 $s=2$ 的异步电动机。起削弱负序磁场的作用，使气隙中的合成负序磁场减弱，相当于异步电机的转子短路情况，等效电抗很小。



(a) 计入电阻

$$r_- \neq r_1$$

$$x_- \ll x_s$$

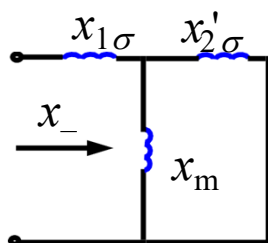


東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

II 负序阻抗

- 假设负序磁场比转子漏磁通大得多，则 $x_m \gg x_{2\sigma}'$
- 假设电机阻尼作用强，如整块实心转子汽轮发电机，则转子感应电流大，其去磁作用使负序磁场大大削弱



(b) 略去电阻

反映负序磁场的作用

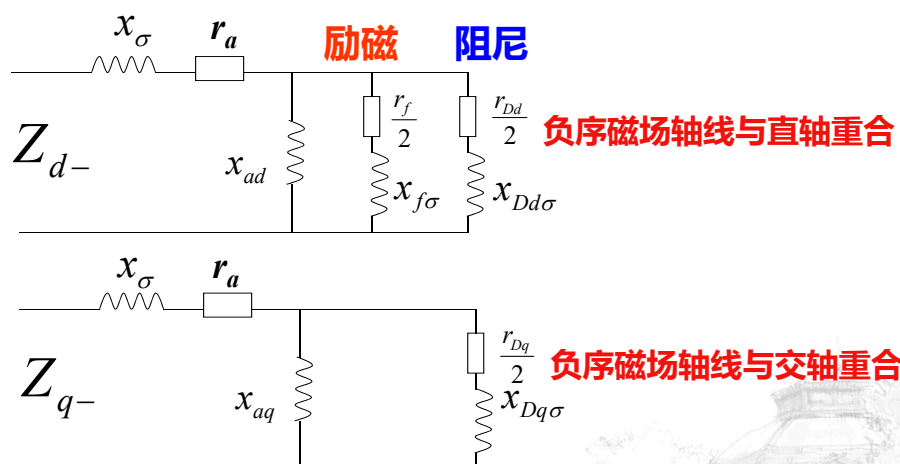


東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

II 负序阻抗

凸极电机负序阻抗简单分析



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II 负序阻抗

测量负序电抗：当转子正向同步旋转，励磁绕组短路，电枢加上对称的负序电压时，负序电枢电流所遇到的阻抗

规定：在额定负载连续运行时，汽轮发电机三相电流之差，不得超过额定值的10%；水轮发电机和同步补偿机的三相电流之差，不得超过额定值的20%，同时，任一相的电流不得大于额定值。



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

II 负序阻抗

负序电流的副作用

1. 负序**感应电流**，产生附加的转子**铜损耗**
2. 负序磁场引起转子表面的**涡流损耗**，产生附加表面损耗
3. 负序磁场与正序磁场相互作用，产生 $2f_1$ 频率的交变电磁转矩，引起**振动**



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

III 零序阻抗

- 当转子正向同步旋转，励磁绕组短接，电枢通过零序电流时所遇到的阻抗
- 三相零序基波磁势合成为零，在气隙中不产生零序磁场
- 各相电枢绕组中的零序电流分量在各相绕组周围产生**零序漏磁通**
- 零序电抗的性质为**漏电抗**
- 3及其倍数次空间谐波合成谐波脉动磁势，对零序阻抗产生影响，且随转子位置（直轴、交轴）的变化而产生脉动，性质为漏抗性质（谐波漏抗）



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

IV 各序的等效电路

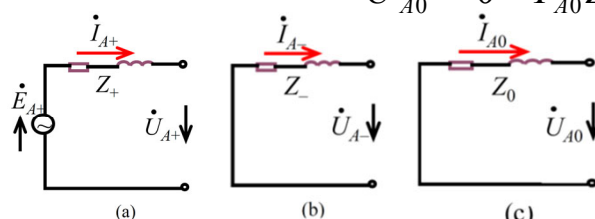
➤ 同步发电机对称运行时的电势平衡方程: $\dot{U} = \dot{E}_0 - \dot{I}Z_s$

➤ 因为电枢绕组结构的对称性, 转子磁场在电机电枢绕组中感应的电势只能是三相对称的电势, 所以没有负序和零序分量。

$$\begin{cases} \dot{E}_{A+} = \dot{E}_A \\ \dot{E}_{A-} = \dot{E}_{A0} = 0 \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} \dot{U}_{A+} = \dot{E}_A - \dot{I}_{A+}Z_+ \\ \dot{U}_{A-} = 0 - \dot{I}_{A-}Z_- \\ \dot{U}_{A0} = 0 - \dot{I}_{A0}Z_0 \end{cases}$$

注意:

转子磁场只在电枢绕组中感应产生正序电势



同步发电机的各序等效电路 (a)正序; (b)负序; (c)零序

2.同步发电机的单相稳定短路

1. 边界条件: 端点方程式

$$\begin{cases} \dot{U}_A = 0 \\ \dot{I}_B = 0 \\ \dot{I}_C = 0 \end{cases}$$

2. 分解为对称分量

$$\dot{I}_{A0} = \dot{I}_{A+} = \dot{I}_{A-} = \frac{1}{3}\dot{I}_A = \frac{1}{3}\dot{I}_{k(1)}$$

$$\dot{U}_{A0} + \dot{U}_{A+} + \dot{U}_{A-} = 0$$

假设: 非短路相空载

$$\dot{I}_{A+} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \alpha\dot{I}_B + \alpha^2\dot{I}_C)$$

$$\dot{I}_{A-} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \alpha^2\dot{I}_B + \alpha\dot{I}_C)$$

$$\dot{I}_{A0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C)$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

2. 同步发电机的单相稳定短路

3. 联立相序方程式：

$$\dot{U}_{A+} = \dot{E}_A - \dot{I}_{A+} Z_+$$

$$\dot{U}_{A-} = 0 - \dot{I}_{A-} Z_-$$

$$\dot{U}_{A0} = 0 - \dot{I}_{A0} Z_0$$

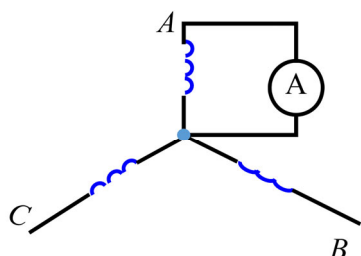
上述3式相加：

$$\dot{E}_A - j\dot{I}_{A+}(x_+ + x_- + x_0) = 0$$

$$\dot{I}_{A+} = \frac{\dot{E}_A}{j(x_+ + x_- + x_0)}$$

4. 单相短路电流为：

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{k(1)} = \frac{3\dot{E}_A}{j(x_+ + x_- + x_0)}$$



假设：非短路相空载



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

3. 同步发电机的两相稳定短路

1. 端点方程式（边界条件）：

$$\begin{cases} \dot{I}_A = 0 \\ \dot{U}_B = \dot{U}_C \\ \dot{I}_B = -\dot{I}_C = \dot{I}_{k(2)} \end{cases}$$

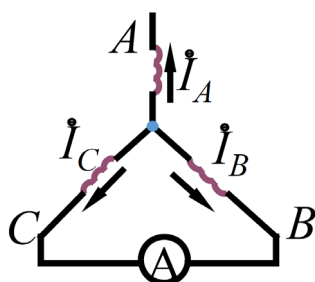
2. 分解为对称分量

$$\dot{U}_{A+} = \dot{U}_{A-}$$

$$\dot{I}_{A+} + \dot{I}_{A-} = 0$$

$$\dot{I}_{A0} = 0$$

$$\dot{U}_{A0} = 0$$



假设：非短路相空载

又因为没有中线连接



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

3. 同步发电机的两相稳定短路

3. 联立相序方程式:

$$\dot{U}_{A+} = \dot{E}_A - \dot{I}_{A+} Z_+$$

$$\dot{U}_{A-} = 0 - \dot{I}_{A-} Z_-$$

$$\dot{U}_{A0} = 0 - \dot{I}_{A0} Z_0$$

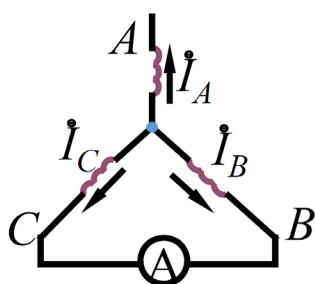
得到各序电流:

$$\dot{I}_{A+} = -\dot{I}_{A-} = \frac{\dot{E}_A}{j(x_+ + x_-)}$$

$$\dot{I}_{A0} = 0$$

$$\dot{I}_{k(2)} = \dot{I}_B = \dot{I}_{B+} + \dot{I}_{B-} + \dot{I}_{B0}$$

$$= \alpha^2 \dot{I}_{A+} + \alpha \dot{I}_{A-} + \dot{I}_{A0} = -\frac{\sqrt{3} \dot{E}_A}{x_+ + x_-}$$



假设: 非短路相空载

4. 两相短路电流:



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

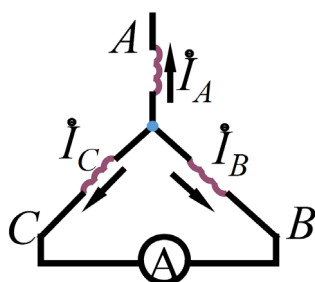
3. 同步发电机的两相稳定短路

5. 由相序方程式得到各相序电压:

$$\dot{U}_{A+} = \frac{\dot{E}_A x_-}{x_+ + x_-}$$

$$\dot{U}_{A-} = \frac{\dot{E}_A x_-}{x_+ + x_-}$$

$$\dot{U}_{A0} = 0$$



假设: 非短路相空载

6. 各相电压:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{A+} + \dot{U}_{A-} + \dot{U}_{A0} = \dot{E}_A \frac{2x_-}{x_+ + x_-}$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_C = \dot{U}_{B+} + \dot{U}_{B-} + \dot{U}_{B0}$$

$$= \alpha^2 \dot{U}_{A+} + \alpha \dot{U}_{A-} + \dot{U}_{A0} = -\dot{U}_{A+}$$

$$= -\frac{1}{2} \dot{U}_A$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

根据短路实验求负序电抗

• 两相短路电流

$$\dot{I}_{k(2)} = \dot{I}_B = \dot{I}_{B+} + \dot{I}_{B-} + \dot{I}_{B0}$$

$$= \alpha^2 \dot{I}_{A+} + \alpha \dot{I}_{A-} + \dot{I}_{A0} = -\frac{\sqrt{3} \dot{E}_A}{x_+ + x_-}$$

引出中线:

$$x_- = -\frac{\sqrt{3} \dot{U}_A}{2 \dot{I}_{k(2)}} = \frac{\sqrt{3} \dot{U}_B}{\dot{I}_{k(2)}}$$

• 开路相电压

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{A+} + \dot{U}_{A-} + \dot{U}_{A0} = \dot{E}_A - \frac{2x_-}{x_+ + x_-}$$

• 短路相电压

$$\begin{aligned} \dot{U}_B = \dot{U}_C &= \dot{U}_{B+} + \dot{U}_{B-} + \dot{U}_{B0} \\ &= \alpha^2 \dot{U}_{A+} + \alpha \dot{U}_{A-} + \dot{U}_{A0} = -\dot{U}_{A+} \\ &= -\frac{1}{2} \dot{U}_A \end{aligned}$$

若未引出中线:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{BA} &= \dot{U}_B - \dot{U}_A = -\frac{3}{2} \dot{U}_A \\ &= \sqrt{3} \dot{I}_{k(2)} x_- \end{aligned}$$



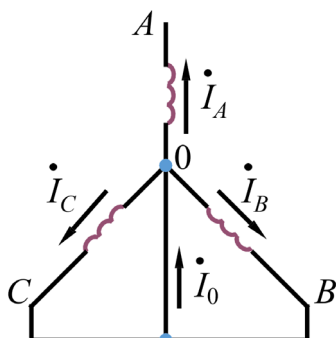
东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

4. 同步发电机的两相对中点短路

• 两相对中点短路

- 设B、C相对中点短路
- 而在分解为对称分量时，则仍以A相的为标准
- 并以 $\dot{I}_{k(1,1)}$ 表示两相短路电流



假设：非短路相空载

$$\begin{cases} \dot{U}_B = 0 \\ \dot{U}_C = 0 \\ \dot{I}_A = 0 \end{cases}$$

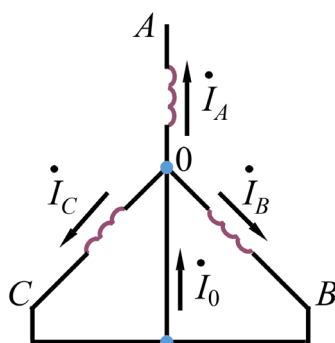


东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

4.同步发电机的两相对中点短路

• 两相对中点短路



端点方程式

$$\begin{cases} \dot{U}_B = 0 \\ \dot{U}_C = 0 \\ \dot{I}_A = 0 \end{cases}$$

对称分量分解:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{A0} + \dot{I}_{A+} + \dot{I}_{A-} = 0 \\ \dot{U}_{A0} &= \dot{U}_{A+} = \dot{U}_{A-} = \frac{1}{3} \dot{U}_A \end{aligned}$$

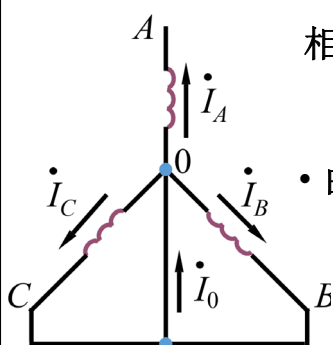
假设: 非短路相空载



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

4.同步发电机的两相对中点短路



相序方程式

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A+} &= \dot{E}_A - \dot{I}_{A+} Z_+ \\ \dot{U}_{A-} &= 0 - \dot{I}_{A-} Z_- \\ \dot{U}_{A0} &= 0 - \dot{I}_{A0} Z_0 \end{aligned}$$

• 由端点和相序方程式可求解各序分量

$$\dot{I}_{A+} = \frac{\dot{E}_A}{j \left(x_+ + \frac{x_- x_0}{x_- + x_0} \right)} = -j \frac{\dot{E}_A (x_- + x_0)}{x_+ x_- + x_+ x_0 + x_- x_0}$$

• 两相对中点短路

假设: 非短路相空载

$$\dot{I}_{A-} = j \frac{\dot{E}_A x_0}{x_+ x_- + x_+ x_0 + x_- x_0}$$

$$\dot{I}_{A0} = j \frac{\dot{E}_A x_-}{x_+ x_- + x_+ x_0 + x_- x_0}$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

4. 同步发电机的两相对中点短路

• A相各序电压

$$\dot{U}_{A+} = \dot{U}_{A-} = \dot{U}_{A0} = \frac{\dot{E}_A x_- x_0}{x_+ x_- + x_+ x_0 + x_- x_0}$$

• B、C相电流

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_B &= \frac{j \dot{E}_A}{x_+ x_- + x_+ x_0 + x_- x_0} [x_- (1 - a^2) + x_0 (a - a^2)] \\ \dot{I}_C &= \frac{j \dot{E}_A}{x_+ x_- + x_+ x_0 + x_- x_0} [x_- (1 - a) + x_0 (a^2 - a)] \end{aligned} \right\}$$

• 两相对中点短路

假设：非短路相空载



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

4. 同步发电机的两相对中点短路

• A相电压

$$\dot{U}_{A+} = \dot{U}_{A-} = \dot{U}_{A0} = \frac{\dot{E}_A x_- x_0}{x_+ x_- + x_+ x_0 + x_- x_0}$$

$$\dot{U}_A = 3 \dot{U}_{A+} = 3 \frac{\dot{E}_A x_- x_0}{x_+ x_- + x_+ x_0 + x_- x_0}$$

• B、C相电流

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_B &= \frac{j \dot{E}_A}{x_+ x_- + x_+ x_0 + x_- x_0} [x_- (1 - a^2) + x_0 (a - a^2)] \\ \dot{I}_C &= \frac{j \dot{E}_A}{x_+ x_- + x_+ x_0 + x_- x_0} [x_- (1 - a) + x_0 (a^2 - a)] \end{aligned} \right\}$$

• 两相对中点短路

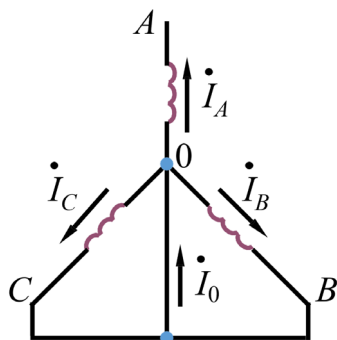
假设：非短路相空载



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

4.同步发电机的两相对中点短路



- 两相对中点短路稳态电流也比三相短路稳态电流大

- 仍以上节例题所取电抗值:

$$I_{k(1,1)} = 1.505 I_{k(3)}$$

• 两相对中点短路

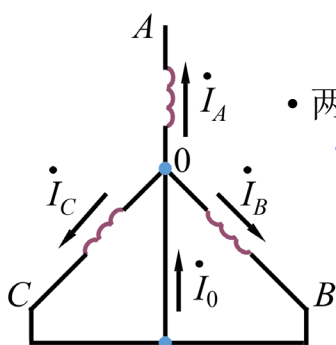
假设: 非短路相空载



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

4.同步发电机的两相对中点短路



- 两相对中点短路试验可测定零序电抗
- 中线的电流为

$$\dot{I}_0 = \frac{j 3x_- \dot{E}_A}{x_+ x_- + x_+ x_0 + x_- x_0} = \frac{j \dot{U}_A}{x_0}$$

- 只需在试验时测量开路电压和中点电流, 就可求得零序电抗

• 两相对中点短路

假设: 非短路相空载



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

思考题

- 同步电机中，转子绕组对正序旋转磁场起什么作用？对负序旋转磁场起什么作用？如何理解正序电抗即系同步电抗？为什么负序电抗要比正序电抗小得多，而零序电抗较负序电抗更小？当三相绕组中流过零序电流时，合成磁势为零，为什么零序电抗不等于零？
- 如果同步电机的电枢三相绕组只引出三相端点及中点，应如何测定零序电抗



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

作业

- 习题：*p.* 301: 14-1~14-2
- 要求：用标么值进行分析计算



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>